

**Э. Г. Аргинбаева\*, Р. М. Назаркин, А. В. Шестаков, Ф. Н. Карачевцев**

ФГУП ГНЦ «Всероссийский институт авиационных материалов», г. Москва

\* *Elargin@mail.ru*

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЖАРОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Доклад отражает экспериментальные исследования режимов термической обработки (ТО) монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией (КГО) [111] литейных ренийсодержащих интерметаллидных никелевых сплавов нового поколения серии ВИН после термической обработки (ТО). Показано, что обработка при температурах  $T_{пр}^{+30^{\circ}\text{C}}_{-20^{\circ}\text{C}}$  повлияла на структурно-фазовое состояние и работоспособность исследуемых сплавов.

*Ключевые слова:* интерметаллид, термическая обработка, жаропрочность, структура, кристаллическая решетка, период кристаллической решетки, мисфит  $\gamma/\gamma'$ .

***E. G. Arginbaeva, R. M. Nazarkin, A. V. Shestakov, F. N. Karachevtsev***

## STRUCTURAL PHASE STATE OF HEAT-RESISTANT CAST INTERMETALLID NICKEL-BASED ALLOYS DEPENDING ON THE THERMAL TREATMENT MODES

The report reflects the experimental investigations of the thermal treatment regimes of single-crystal bars with crystallographic orientation (CGO) [111] foundry rhenium-containing intermetallic nickel alloys of the new generation of VIN series after heat treatment. It has been established that the treatment at temperatures close to  $T_{solv}^{+30^{\circ}\text{C}}_{-20^{\circ}\text{C}}$  affected the structural-phase state and the operability of the alloys under study.

*Keywords:* intermetallic, heat treatment, heat resistance, structure, crystal lattice, crystal lattice period, misfit  $\gamma/\gamma'$ .

Лопатки, наиболее ответственный детали авиационных газотурбинных двигателей, как правило, изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов: рабочие из сплавов серии ЖС и ВЖМ, сопловые – из интерметаллидных никелевых сплавов серии ВКНА и ВИН.

Достижение характеристик жаропрочных сплавов возможно

посредством легирования, а также варьируя технологические параметры его направленной кристаллизации и термической обработки. В последнее время, как и для жаропрочных никелевых сплавов, исследования воздействия внешних факторов на макро- и микроструктуру дополняется исследованиями «тонкой структуры» – структурно-фазового состояния.

В представленном докладе авторы демонстрируют исследования режимов термической обработки на ренийсодержащие сплавы марок ВИН1 и ВИН4 [1-3].

Поскольку температура солвус обоих сплавов находится в одном диапазоне значений (ВИН1 – 1260 °С, ВИН4 – 1270 °С), исследования проводили после одних режимов ТО. Основываясь на ранее проведенных при разработке сплава ВИН4 исследованиях, была подобран первый режим. Монокристаллы [111] интерметаллидных ренийсодержащих сплавов ВИН1 и ВИН4 прошли пятичасовой отжиг при температурах:

- $(T_{пр} - (10 \div 20))^\circ\text{C}$  – режим ТО № 1;
- $(T_{пр} + (0 \div 10))^\circ\text{C}$  – режим ТО № 2;
- $(T_{пр} + (20 \div 30))^\circ\text{C}$  – режим ТО №3.

Рентгеноструктурный анализ показал, что с ростом температуры отжига растет и параметр кристаллической решетки  $\gamma$ -фазы ( $a_\gamma$ ), значения параметра кристаллической решетки ( $a_{\gamma'}$ )  $\gamma'$ -фазы, мисфита  $\gamma/\gamma'$  с 0,50 до 0,69 %, как следствие – увеличилось время до разрушения с 156 ч до 256 ч при испытаниях на длительную прочность при 1100 °С.

Микроструктурные исследования образцов сплава ВИН1 после испытаний показали, что после ТО по всем проведенным режимам в прослойках  $\gamma$ -фазы произошел типичный для жаропрочных никелевых сплавов распад  $\gamma$ -фазы и выделение вторичной  $\gamma'$ -фазы, повышающей жаропрочность. Состав сплава остался двухфазным (рис. 1).

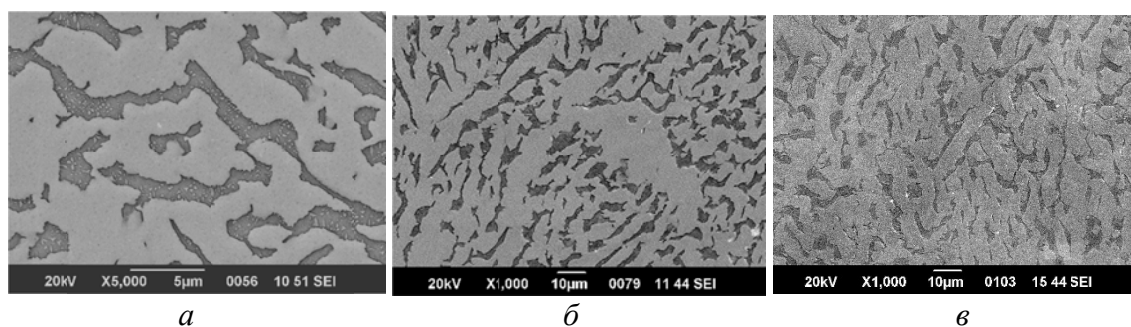


Рис. 1. Микроструктура рабочих частей образцов сплава ВИН1 после ТО и испытаний на длительную прочность ( $\tau^{1100}_{\sigma=100 \text{ МПа}}$ ): а – по режиму № 1, б – по режиму № 2, в – по режиму № 3

Рентгеноструктурный анализ образцов после испытаний показал, что структурно-фазовые параметры образцов как в рабочей части, так и в головке образца остался на уровне значений для сплава после термической обработки (0,67–0,69). Что подтверждает стабильность

структуры сплава и верность подобранного режима ТО.

Надо сказать, что исследования влияния ТО на структурно-фазовые параметры сплава ВИН4 мы дополнили режимом, исследованным ранее в работе: закалка с ( $T_{пр} - (10 \div 20)$ ) °С после выдержки в течение 5 ч; старение при 850 °С в течение 5 ч [5]. Отжиг по режимам № 1, 2 и 3 также подтвердил общую тенденцию роста мисфита  $\gamma/\gamma'$  и долговечности никелевых сплавов: мисфит увеличился с 0,31 до 0,61 %. При этом результаты испытаний на жаропрочность не имеют общей тенденции (рис. 2). На микроструктурных исследованиях сплава после ТО по режимам № 1–3 останавливаться не будем, т. к. значительных структурных изменений не произошло.

Структура сплава после ТО № 4 – напротив. Обнаружены тугоплавкие фазы с повышенным содержанием молибдена, хрома, рения. Ввиду ускоренного охлаждения, наиболее ярко они проявились после обработки по режиму № 4 (рис. 2).

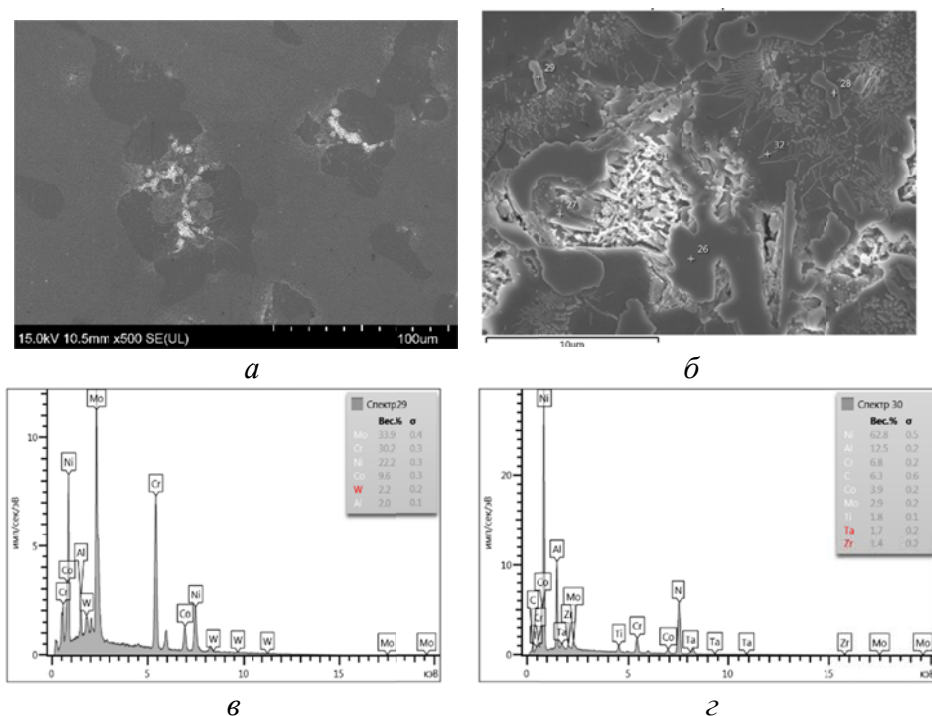


Рис. 2. Микроструктура межфазных областей и локальный химический анализ спектров образца сплава ВИН4 после термической обработки по режиму № 4

Согласно результатам исследований, спектры 26, 28 и 29 –  $\gamma_k$ -фаза с повышенным содержанием молибдена и хрома; 27, 30 и 31 – фаза типа  $\beta$  (легированный NiAl).

Микроструктура образца после ТО и испытаний приведена на рис. 4 и 5. Область спектра 54 –  $\gamma'$ -фаза в межосном пространстве, 55 – ось дендрита, которую пересекают пластины фазы, обогащенной тугоплавкими элементами Re, Mo и W (спектр 50).

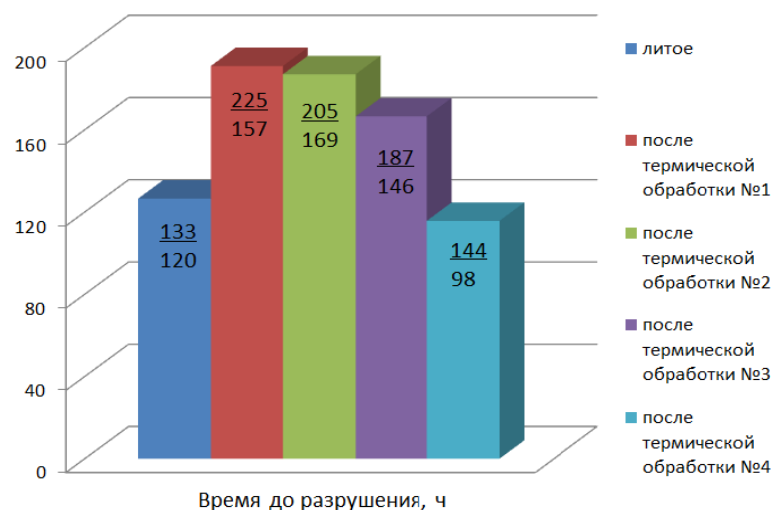


Рис. 3. Результаты испытаний интерметаллидного сплава ВИН4 на длительную прочность при температуре 1100 °С и нагрузке 100 МПа

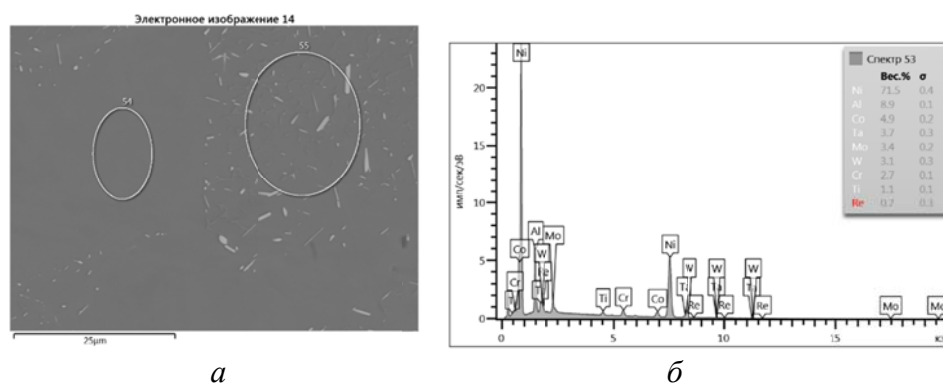


Рис. 4. Локальный химический анализ образца сплава ВИН4 после ТО по режиму № 3 и испытаний на длительную прочность ( $\tau_{\sigma=100 \text{ МПа}}^{1100} = 187 \text{ ч}$ )

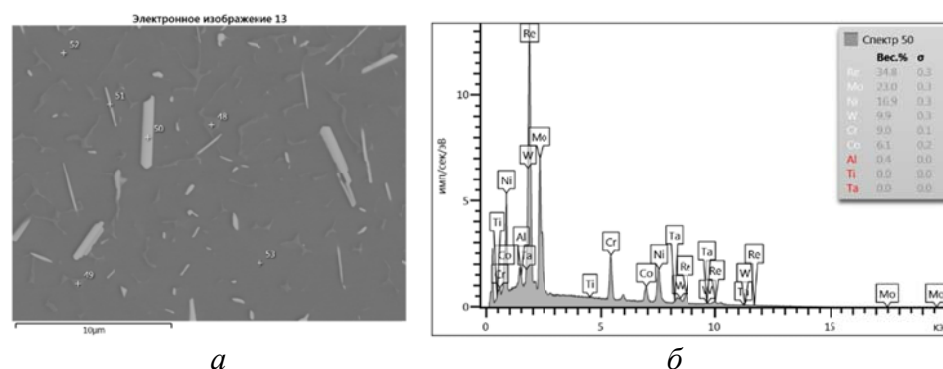


Рис. 5. Локальный химический анализ образца сплава ВИН4 после ТО по режиму № 3 и испытаний на длительную прочность ( $\tau_{\sigma=100 \text{ МПа}}^{1100} = 187 \text{ ч}$ ) в межзосном пространстве

Подводя итоги: найден режим ТО, обеспечивающий стабильно высокие значения жаропрочности интерметаллидного сплава ВИН1. Что касается сплава ВИН4 – сопоставление проведенных исследований дает основания говорить о том, что легированный рением и танталом интерметаллидный сплав ВИН4 более чувствителен к температурно-временным параметрам термической обработки, а также скорости

охлаждения. Так, закалка с температуры ( $T_{пр} \pm 20$  °С), привела к перераспределению элементов и образованию неравномерно распределенных фаз типа  $\gamma_k$  в нескольких модификациях, обедняя твердый раствор  $\gamma$ -фазы. Отжиг в интервале ( $T_{пр} \pm 20$  °С) в течение 5 ч позволил повысить мисфит  $\gamma/\gamma'$  и время до разрушения при испытаниях на длительную прочность при 1100 °С, обеспечив незначительный разброс в результатах.

Таким образом, поставлены вопросы к дальнейшим поискам параметров термической обработки интерметаллидных сплавов, содержащих тяжелые тугоплавкие элементы, положительно влияющего на структурно-фазовый состав и свойства.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00260 «Исследование закономерностей формирования структурно-фазового состояния жаропрочных литейных интерметаллидных сплавов на основе никеля после различных режимов термической обработки».*

*Авторы выражают глубокую благодарность соавтору сплавов ВИН1 и ВИН4 О. А. Базылевой, канд. техн. наук, зам. начальника по науке лаборатории «Жаропрочные сплавы на основе никеля» ФГУП «ВИАМ».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Базылева О. А. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД / О. А. Базылева, Э. Г. Аргинбаева, Е. Ю. Туренко // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 26–31.
2. Каблов Е. Н. Новый монокристаллический интерметаллидный жаропрочный сплав на основе  $\gamma'$ -фазы для лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, Н. В. Петрушин // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 34–40.
3. Базылева О. А. Структурные параметры и механические свойства интерметаллидного сплава на основе никеля, полученного методом направленной кристаллизации / О. А. Базылева, Э. Г. Аргинбаева, А. В. Шестаков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. № 12. С. 1.
4. Морозова Г. И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // МиТОМ. 2012. № 12. С. 52–58.
5. Аргинбаева Э. Г. Влияние легирования, технологий литья и термической обработки на структуру и свойства интерметаллидных сплавов на основе никеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Э. Г. Аргинбаева. Москва : ВИАМ, 2014. 26 с.